

УДК 681.7:62-229.312+621.373.826

Федорець О.В., студент гр. ПО-92мп, к.ф.-м.н., доц. Богатирьова Г.В.
КПІ ім. Ігоря Сікорського

ОПТИЧНИЙ ПІНЦЕТ: ЕФЕКТИВНІСТЬ ЛАЗЕРНИХ МЕТОДІВ МАНІПУЛЮВАННЯ АТОМАМИ

Анотація: показано можливість використання оптичних технологій маніпулювання атомами на противагу механічним технологіям у вигляді звичайного пінцету. Лазерний пінцет є практично безальтернативним у випадку роботи з дуже малими розмірами.

Ключові слова: лазерний пінцет, оптичне маніпулювання атомами, лазерні методи маніпулювання атомами.

ВСТУП

Пінцет – інструмент, яким утримують і переміщують дрібні деталі. Надто дрібних деталей мікронних розмірів або хромосом в живій клітині не можна торкатися, інакше вони зруйнуються. Використовувати класичний, навіть надмініатюрний пінцет неможливо. А можливість захопити та перемістити мікрооб'єкт – нагальна задача сучасної мікро- і нанотехнології. Вирішення цього завдання прийшло з лазерної техніки останніх років.

Механічний пристрій для управління мікроскопічними об'єктами створити досить складно. Але достатні для цього зусилля здатні створювати лазерні промені. Сама ідея лазерних методів маніпулювання атомами бере витoki від робіт радянських фізиків: у 1979 році в Інституті спектроскопії АН СРСР доктор фізико-математичних наук В. С. Летохов разом з співробітниками здійснили перший вдалий експеримент по гальмуванню світлом пучка атомів натрію. Однак пристрій, що названо оптичним пінцетом, вперше продемонстрували в 1986 році американські дослідники із наукового центру "Белл-лаб" [1].

ПРИНЦИП ДІЇ ТА ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ

Принцип дії оптичного пінцета заснований на тому, що світловий потік має імпульс і при зміні його напрямку виникає сила, пов'язана з цією зміною.

Поняття імпульсу прийшло з механіки, де імпульсом називають добуток маси тіла на швидкість його руху. Швидкість – вектор, який характеризує не тільки величину, а й напрям. А оскільки рух будь-якого тіла відбувається під дією сили, зміна напрямку швидкості пов'язана зі зміною напрямку дії сили.

Фотон характеризується енергією E та імпульсом p , який, за аналогією з механічним випадком, є добуток його маси на швидкість світла: $p = mc$ (тут мається на увазі маса рухомого фотона, так як маса спокою фотона дорівнює нулю). Якщо фотон падає на непрозору (яка поглинає або відбиває) поверхню, то імпульс, що прикладено до неї є, по суті справи, тиском світла на цю поверхню. Але якщо висвітлити лазером прозору частку, то світловий пучок зазнає на ній заломлення – напрям вектору швидкості світла i , отже, напрямок імпульсу фотонів зміниться. Користуючись механічною аналогією, можна сказати, що при цьому виникає зміна сили, яке подіє на частку так, що вона рушить у бік найбільшої інтенсивності лазерного пучка [2].

Інтенсивність лазерного пучка максимальна на його осі та плавно спадає до країв. Закон зміни інтенсивності відповідає так званому нормальному, або гауссовому розподілу, якому підпорядковуються всі природні процеси. Тому частка утримується на осі пучка, а при фокусуванні пучка лінзою вона "втягується" у точку фокусу та виявляється "спійманою" в трьох вимірах. Щоб створити сили, здатні здійснити таку "тривимірну пастку", потрібно випромінювання потужністю порядку декількох міліват.

Переміщенням фокусу можна пересувати частинки, вибудовуючи з них найрізноманітніші конструкції. Сучасна технологія створює абсолютно фантастичну картину: промінь лазера рухається, і під його впливом у просторі матеріалізується необхідний об'єкт.

Об'єднуючи метод оптичного пінцета з використанням інших лазерних пучків, дослідники можуть, наприклад, захопити окрему хромосому та розрізати на шматочки для подальшого аналізу. Для захоплення можна застосувати інфрачервоне випромінювання з довжиною хвилі $\lambda=1,064$ мкм, а другу його гармоніку – зелене світло ($\lambda=0,532$ мкм) – для розрізання в якості "оптичних ножиць": біологічні об'єкти майже прозорі в інфрачервоній області, але сильно поглинають зелене світло.

Оптичний пінцет є зручним інструментом, що має, однак, ряд недоліків.

По-перше, чим сильніше стягнутий пучок у фокус, тим швидше він розходить після нього. Це означає, що сила, що утримує частку, досить швидко падає по мірі віддалення від зони захоплення, і вже на відстані кількох десятків мікрон від фокуса виявляється недостатньою, щоб знову захопити частку. Однопучкова пастка реально корисна лише для захоплення одиночної частинки та тільки в області фокуса.

По-друге, лазерний пучок після зустрічі з об'єктом буде відрізнятися від вихідного через дифракції, заломлення, відображення і поглинання. Це також обмежує відстань, на якому він може діяти як оптичний пінцет.

Існує і ще одна обставина, пов'язана з розходимістю самого лазерного пучка. Чим сильніше він розходить, тим гірше його фокусує оптична система, але отримати ідеально паралельний пучок принципово неможливо через дифракції. І довгий час не було навіть думки про те, що можна якось обійти це обмеження. Але в 1987 році американські фізики Дж. Дарнін, Дж. Майсел і В. Еберлі показали, що існує клас світлових пучків, фактично вільних від дифракції. Їх проекція на екран виглядає як яскрава пляма, оточена системою концентричних кілець (такий розподіл інтенсивності описує відома в математиці функція Бесселя, і тому самі пучки називають Беселеві).

Звичайний гаусів пучок перетворюють у пучок Бесселя за допомогою так званого аксікона – конічної лінзи, яка фокусує паралельний пучок променів не в точку, а в відрізок прямої лінії на оптичній осі. (Існують також інші методи, засновані на використанні голограм або просторових модуляторів світла.) Цей центральний промінь подібний "світловому шнуру", що не розходить, постійної інтенсивності [3].

Беселевому пучку притаманна одна визначна властивість. На відміну від гауссова пучка, який спотворюється після проходження через частку, він має

здатність самостійно відновлюватися. Частина хвиль, що виходять з конічної поверхні аксікона, проходять повз перешкоди та сходяться позаду нього; їх інтерференція утворює неспотворений пучок. Це дозволяє подолати обмеження, притаманне оптичному пінцету на гауссовому пучку, здатному захопити лише частки, розташовані дуже близько одна до одної. Було показано, що оптичний пінцет, який використовує пучок Бесселя, здатний захоплювати частинки, рознесені на відстань 3 міліметри та лежать в окремих незалежних осередках. У цих експериментах використовувалося лазерне випромінювання з довжиною хвилі 1,064 мкм, що створює пучок Бесселя з яскравою центральною плямою, оточеною 19-ма кільцями. Загальна потужність випромінювання становила 700 мВт, з якої на центральну пляму припадало приблизно 35 мВт. Захоплювалась порожня сфера діаметром близько 5 мікрон між центральною плямою і першим кільцем пучка. Сфера спотворювала пучок, який за нею відновлювався і працював як оптичний пінцет, що зводить разом три кварцові сфери діаметром 5 мікрон. Після цього пучок відновлювався ще раз.

Інша відмінність оптичних пінцетів на беселевому пучку полягає в їх здатності захоплювати відразу декілька різних частинок. Наприклад, в експериментах проводилось одночасне захоплення суцільної кварцової сфери в першій клітинці, порожньої сфери в другій і частки з двозаломлюючого матеріалу в третій. Порожня сфера має менший показник заломлення, ніж вода, що заповнює осередки, і тому виштовхується з областей високої інтенсивності світла. Її захоплення відбувалося в темних зонах беселевого пучка між кільцями.

За допомогою оптичних пінцетів вимірювали механічні властивості молекул ДНК, прикріплюючи до їх кінців полістирольні намистинки та розтягуючи їх. Дослідники з Гарвардського університету вкладали еритроцити на білкову основу в кільця, ланцюжки та тетраедри, створюючи моделі клітинних "датчиків", налаштованих на виявлення певних хімічних речовин. Оптичний пінцет вже використовують для пересадки генів, і при штучному заплідненні [4].

Експерименти, що заслуговують на увагу, виконані в угорському біологічному дослідному центрі. Там розроблена методика отримання мікроскопічних об'єктів довільної форми в результаті полімеризації клейкої маси під дією світла. Оптичний пінцет на основі інфрачервоного ($\lambda = 0,994$ мкм) напівпровідникового лазера захоплював і утримував у фокусі мікрочастинки. Далі використовувалася так звана двофотонна методика: клей висвітлювали ультрафіолетовим лазером, що генерує дві довжини хвилі, які трохи розрізняються, поблизу 0,340 мкм, а необхідна для полімеризації інтенсивність досягалася фокусуванням у потрібній точці випромінювання аргонного лазера ($\lambda = 0,514$ мкм). У результаті впливу світла утворювався твердий полімер. Високоточний трьохкоординатний п'єзоелектричний маніпулятор, керований комп'ютером, переміщував матеріал відносно фокусу, створюючи мікроскопічні деталі – ротори, шестерінки, пропелери. Було виявлено, що при зсуві точки фокусу світло, відхиляючись від частки, призводить її в обертання. Величина та напрям моменту обертання залежать від

орієнтації ротора або шестерінки в фокусі. Якщо ротор оснащувався центральною віссю, стійкість його захоплення у пінцеті підвищувалася, а при збільшенні числа зубців шестерні обертання ставало більш рівномірним. При потужності випромінювання 20 мВт конструкція рівномірно оберталася з частотою до декількох обертів на секунду. Звідси – один крок до створення діючих мікромашин, керованих світлом. Автори сконструювали дві зчеплені шестерінки, що сидять на фіксованих осях, і вільно плаваючий ротор. Ротор захоплювали лазерним пінцетом, приводили в обертання і потім підводили до пари шестерень, змушуючи їх крутитися [5].

ВИСНОВОК

Існує технічна можливість виготовляти та використовувати такий прилад, як пінцет, що може захоплювати та перемішувати надто дрібні деталі мікронних розмірів, у тому числі хромосоми в живій клітині. Це рішення розроблюється понад 40 років і оптичний пінцет здійснив революцію в мікротехніці. Зараз у лабораторних умовах вже реалізовані високоточні трьохкоординатні п'єзоелектричні маніпулятори, що керовані комп'ютером, здатні перемішувати матеріали відносно фокусу, створюючи мікроскопічні деталі, які є подібними до деталей механічних пристроїв, що надає змогу на принципово новому рівні реалізовувати пристрої та вирішувати технічні задачі науки та виробництва.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

- [1] Квасікова, Г. С. (2017). Розрахунок молекулярних сталих та імовірностей кооперативних коливально-ядерних переходів у спектрах двоатомних молекул. Науковий керівник: Хецеліус, О.Ю., д.ф.-м.н., проф. (ОДЕКУ), 51-68.
- [2] Ракитянский, М. М., Агранат, М. Б., Ашитков, С. И., Карагяур, М. Н., Мухамеджанова, С. П., Шевелев, И. Н. (2014). Исследования биологических объектов на клеточном и субклеточном уровне с помощью фемтосекундного лазерного оптического пинцета-скальпеля. Вестник трансплантологии и искусственных органов, 11(3), 107-113.
- [3] Арцер, И. Р., & Рождественский, Ю. В. (2019). Световое давление на неоднородную сферическую частицу в поле лазерного пинцета. Журнал экспериментальной и теоретической физики, 156(5), 853-867.
- [4] Потемкин, А.П., & Лускинович, П.Н. (2017). Нанопинцет для манипулирования частицами.
- [5] Кучьянов, А. С., Мальцева, Е. О., Плеханов, А. И., Игуменов, И. К., & Кучумов, Б. М. (2014). Активная среда лазера.